МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 533.6, 624.046.3 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378

Численное моделирование поперечного обтекания пролетных строений балочных мостов*

Ю. А. Гостеев[1], А. Д. Обуховский[2], С. Д. Саленко[3]**
[1,2,3] Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

Numerical simulation of the transverse flow over spans of girder bridges ***

Yu. A. Gosteev[1], A. D. Obukhovskiy[2], S. D. Salenko[3]**
[1,2,3] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Введение. Верифицирована методика численного моделирования поперечного обтекания пролетных строений мостов на основе нестационарного решения Рейнольдса для уравнений Навье — Стокса (URANS, Unsteady Reynolds-averaged Navier — Stokes). Данный двумерный подход используется в современных методах и пакетах прикладных программ вычислительной гидроаэродинамики. Цели работы — отладка и экспериментальное обоснование указанной методики. Для реализации поставленной цели использована ранее разработанная авторами база данных по аэродинамическим характеристикам поперечных сечений пролетных строений балочных мостов типовых форм.
Материалы и методы. Проведено численное моделирование поперечного обтекания мостовых строений низкотурбулентными (гладкими) и турбулентными воздушными потоками в диапазоне практически интересных углов атаки. В итоге использовалась модель турбулентности SST $k-\omega$. Методика предварительно отработана на тестовой задаче обтекания балок прямоугольного поперечного сечения. Расчеты проводились с помощью лицензионного программного комплекса ANSYS.
Результаты исследования. Показано, каким образом угол атаки определяет силы (подъемную и лобового сопротивления) и момент поперечных сечений балочных мостов типовых форм. Полученные расчетные зависимости относятся к пролетным строениям на стадиях монтажа (без плиты перекрытия и ограждений, без ограждений) и эксплуатации в условиях модельных набегающих потоков — гладкого и турбулентного. Это позволяет очертить границы для более взвешенных оценок аэродинамических характеристик балочных мостов в реальном ветровом потоке. Лобовое сопротивление сечению демонстрирует наилучшее согласование с опытными данными. Величина подъемной силы более чувствительна к наличию и протяженности отрывных зон, поэтому ее расчетное определение менее точно. Наиболее проблемным для большинства конфигураций является воспроизведение влияния угла атаки на аэродинамический момент сечения.

Introduction. The technique of numerical modeling of the transverse flow over span structures of bridges on the basis of the two-dimensional URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) approach used in the modern methods and software packages for computational fluid dynamics is verified. The work objective was debugging and experimental substantiation of this technique with the use of the database on the aerodynamic characteristics of the cross-sections of span structures of girder bridges of standard shapes pre-developed by the authors.
Materials and Methods. A numerical simulation of the transverse flow of low-turbulent (smooth) and turbulent air flows around the bridge structures in a range of practically interesting attack angles is carried out. SST $k-\omega$ turbulence model was used as the closing one. The technique was preliminarily tested on the check problem for the flow of the rectangular cross-section beams. Calculations were carried out using the licensed ANSYS software.
Research Results. The calculated dependences on the attack angle of the aerodynamic coefficients of forces (drag and lift) and the moment of the cross sections of the girder bridges of standard shapes are obtained. These data refer to the span structures at the construction phase (without deck and parapets, without parapets) and operation phase, under the conditions of model smooth and turbulent incoming flow. The latter allows us to outline the boundaries for more weighted estimates of the aerodynamic characteristics of the girder bridges in a real wind current. The best agreement with the experimental data was obtained from the drag of the cross-section. The magnitude of the lifting force is more sensitive to the presence and extent of the separation regions, so its numerical determination is less accurate. The reproduction of the angle-of-attack effect on the aerodynamic moment of the cross-section is the most challenging for the majority of configurations.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail:gosteev@corp.nstu.ru, obuxovskij@corp.nstu.ru, salenkosd@yandex.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

Обсуждение и заключения. Сравнение расчетных и опытных данных свидетельствует о применимости URANS-подхода к оперативному предсказанию аэродинамических характеристик однобалочных пролетных строений. Если же речь идет о многобалочных пролетных строениях, существенную роль играет аэродинамическая интерференция между отдельными балками. В этом случае вместо URANS-подхода следует применять более точные вихреразрешающие методы. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях аэродинамики сооружений и в практике проектных организаций в сфере транспортного строительства.

Discussion and Conclusions. Comparison of the calculated and experimental data indicates the applicability of the URANS approach to the operational prediction of the aerodynamic characteristics of the single-beam span structures. In the case of multi-beam span structures, where the aerodynamic interference between separate girders plays an important role, the URANS approach must apparently give way to more accurate eddy-resolving methods. The results obtained can be used in the aerodynamic analysis of structures and in practice of the relevant design organizations in the field of transport construction.

Ключевые слова: механика жидкости, газа и плазмы; математическое моделирование; вычислительная гидроаэродинамика; URANS-подход; пролетные строения мостов; аэродинамические характеристики.

Keywords: mechanics of fluid, gas and plasma; mathematical simulation; computational aerohydrodynamics, URANS approach, bridge spans, aerodynamic characteristics.

Образец для цитирования: Гостеев, Ю. А. Численное моделирование поперечного обтекания пролетных строений балочных мостов / Ю. А. Гостеев, А. Д. Обуховский, С. Д. Саленко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 4. — С. 362-378. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378

For citation: Yu.A. Gosteev, A.D. Obukhovskiy, S.D. Salenko. Numerical simulation of the transverse flow over spans of girder bridges. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 362-378. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378

Введение. Известно, что обтекание ветром инженерных сооружений носит, как правило, нестационарный турбулентный характер, в потоке наблюдаются разномасштабные вихревые структуры [1, 2]. Вблизи плохообтекаемых тел (к которым, в частности, относятся пролетные строения мостов) возникают нестационарные отрывные зоны [3]. В связи с этим адекватное моделирование эффектов турбулентности становится важным требованием к методике вычислительного эксперимента.

Для оценки аэродинамики сооружений используется моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) и гибридное описании потока (Detached Eddy Simulation, DES). Однако применение указанных методов осложнено их повышенной ресурсоемкостью, причины которой:

— трехмерность задачи;
— высокие требования к плотности расчетной сетки в пристеночной области и в области «фокуса» [4];
— ограничения на шаг интегрирования по времени;
— относительно большая длительность временного «окна» для сбора нестационарной статистики в установившемся режиме.

В то же время известно [5], что для цилиндрических призм, близких по форме к балочным мостовым пролетным строениям, двумерный подход воспроизводит основные свойства течения (первичная неустойчивая мода в следе за телом существенно двумерна). Так, в работе [6] выполнен POD-анализ (Proper Orthogonal Decomposition — истинное ортогональное разложение) течения вблизи призмы с относительной шириной сечения $B/H=5$ (H — высота сечения). В результате установлено, что 1-я и 2-я моды возмущений двумерны (постоянны по пролету) и соответствуют переносу вихрей вдоль поверхности. Трехмерные моды изменяются по пролету на характерной длине, которая не меньше ширины сечения B.

Для оперативного предсказания аэродинамических характеристик (АДХ) мостовых сооружений и сопровождения продувок в аэродинамической трубе авторы настоящей работы использовали нестационарное двумерное моделирование на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (URANS-подход, Unsteady Reynolds-averaged Navier — Stokes). Его применимость к определению АДХ плохообтекаемых тел (неподвижных и колеблющихся) изучалась в ряде работ зарубежных авторов (см., например, [7]).

Материалы и методы. При постановке компьютерных экспериментов учитывались приведенные в [8–10] рекомендации. Расчеты проводились в программе Fluent комплекса ANSYS.

Предварительно методика была отработана на тестовой задаче обтекания балок прямоугольного поперечного сечения. В итоге для описания турбулентности потока была выбрана модель переноса сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport, SST) k — ω, подобраны параметры сетки и численного алгоритма.

Протяженность прямоугольной расчетной области в продольном направлении — $(30 \dots 40)H$, в поперечном — $(14 \dots 20)H$. Передняя грань обтекаемого тела отстояла от входной границы на $(8 \dots 12)H$.

Использовались низкорейнольдсовые сетки (безразмерное расстояние первого узла до стенки $y^+ \leq$ 4…5), позволяющие рассчитывать отрыв и присоединение пограничного слоя. Ввиду сложности контуров обтекаемых тел строились многоблочные сетки. Внутренний, охватывающий тело, блок состоял из четырехугольных элементов, плотность которых ближе к поверхности тела увеличивалась. Непосредственно у стенки создавался слой со структурированной ортогональной четырехугольной сеткой. Область следа покрывалась сеткой из квадратных ячеек размером не более $H/15 \dots H/10$. К внешним границам размер ячеек возрастал до $H/4 \dots H/3$. На периметр сечения в зависимости от его формы приходилось порядка $10^2 \dots 10^3$ ячеек. Общее количество ячеек варьировалось от 40–50 тысяч (для сечений простых форм) до 250–300 тысяч (для сложных). Пример расчетной сетки возле балки трапециевидного сечения с перекрытием и ограждениями приведен на рис 1.

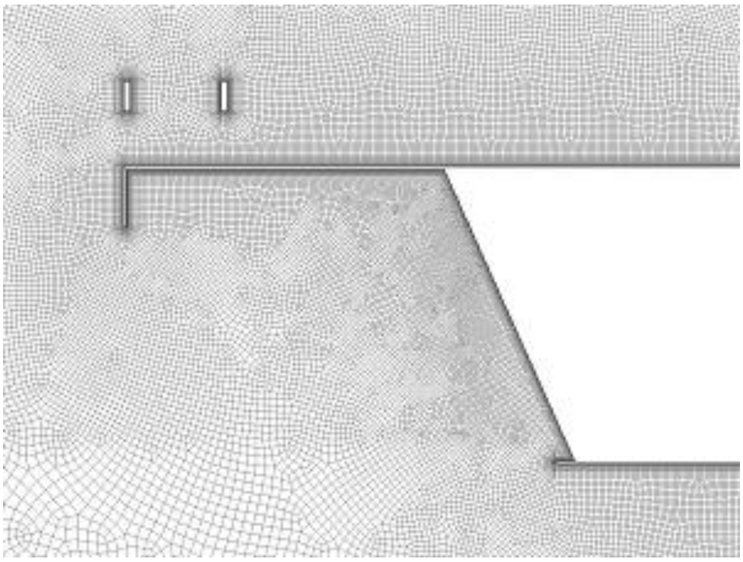
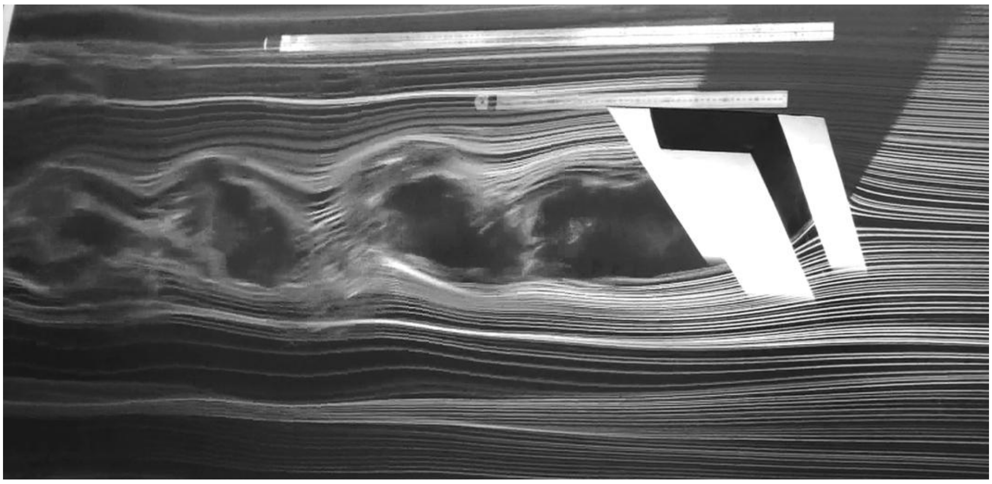


Рис. 1. Пример расчетной сетки (фрагмент)

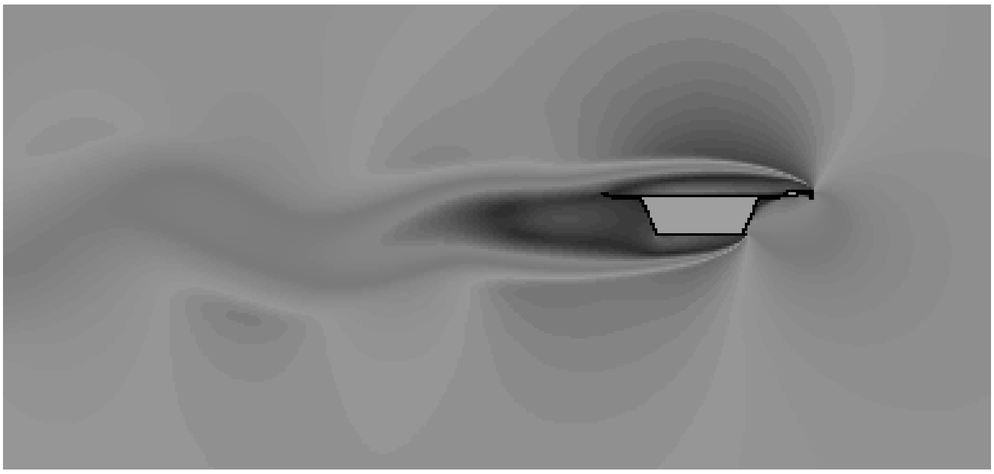
При решении уравнений Навье — Стокса связь скорость — давление реализовывалась с помощью алгоритма SIMPLE. Конвективные и вязкостные члены уравнений движения жидкости и переноса турбулентных параметров аппроксимировались схемами второго порядка точности.

Численное интегрирование осуществлялось неявной по времени схемой 2-го порядка точности. Шаг интегрирования Δt составлял $(0{,}02 \dots 0{,}04)H/V_\infty$ (V_∞ — скорость набегающего потока), т. е. при сходе вихрей с безразмерной частотой $fH/V_\infty = 0{,}1$ был приблизительно в 250–300 раз меньше периода $1/f$, и это обеспечивало приемлемое разрешение нестационарных параметров потока. Установившаяся вихревая дорожка обычно формировалась к моменту $(60 \dots 120)H/V_\infty$. Таким образом, общее число шагов интегрирования составляло в среднем 6000÷10000. Для сбора нестационарной статистики использовался отрезок времени, не меньший 5 периодов.

Пример качественного сопоставления расчетной и опытной картин течения вблизи пролетного строения приведен на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Пример картины обтекания пролетного строения: эксперимент (*а*), расчет (*б*)

Результаты исследования. Подробные сведения по АДХ типовых поперечных сечений можно найти в [11]. На рис. 3–14 представлено сравнение расчетных и опытных данных по коэффициентам осредненных аэродинамических сил (лобового сопротивления, подъемной силы) и момента для некоторых характерных сечений.

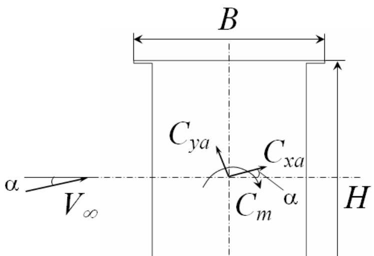


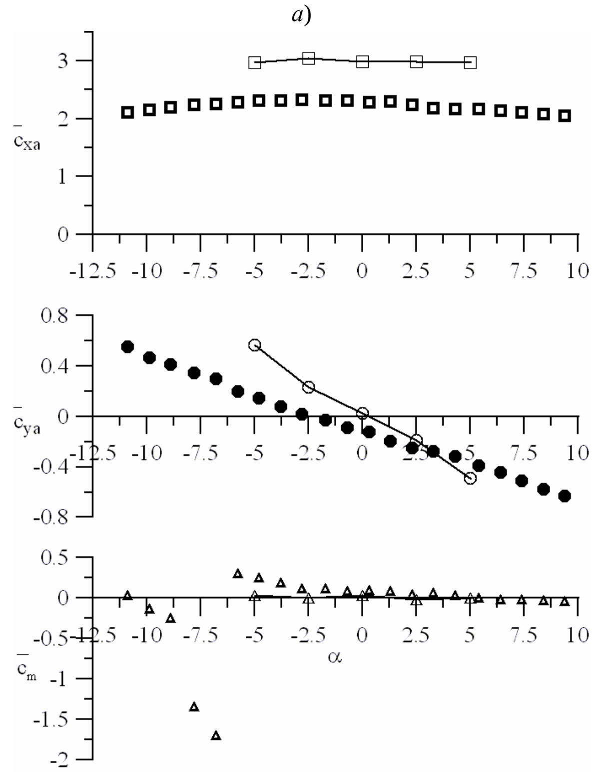
Рис. 3. Коэффициенты осредненных аэродинамических сил.
Здесь: $\bar{C}_{xa}$ — лобовое сопротивление; $\bar{C}_{ya}$ — подъемная сила; $\bar{C}_m$ — момент;
B и H — продольный и поперечный размеры сечения (без учета ограждений); α — угол атаки

Набегающий гладкий поток характеризуется интенсивностью 0,5 %, турбулентный — 8 %. Расчетные данные представлены сплошными линиями.

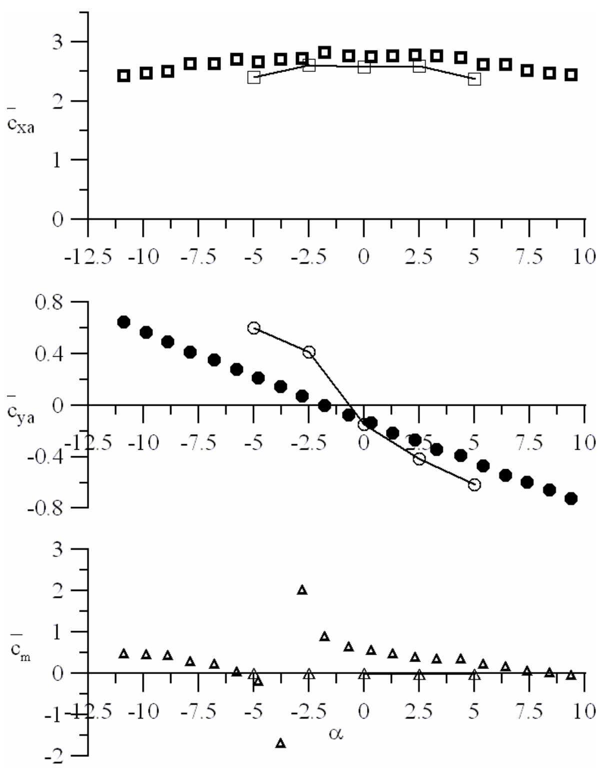


$B/H = 0{,}75$

а)



б)



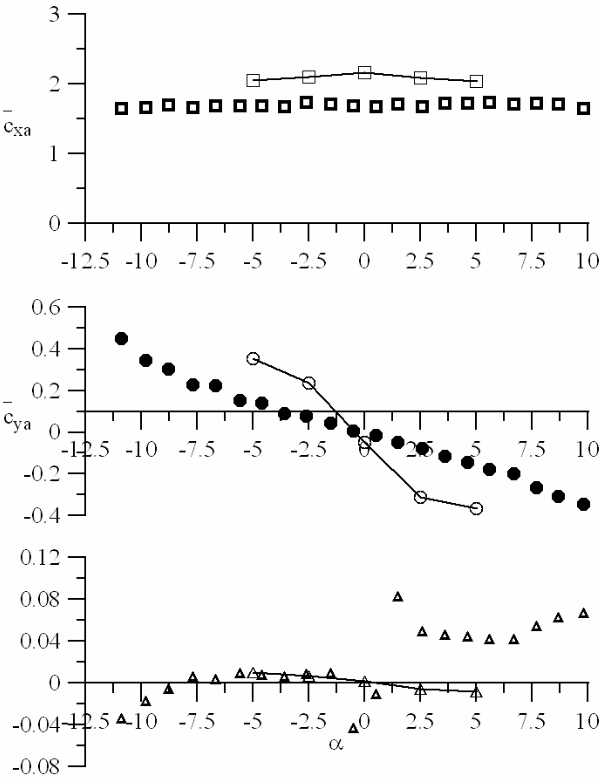
в)

Рис. 4. Узкая одиночная прямоугольная балка (соотношение B/H 0,75):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

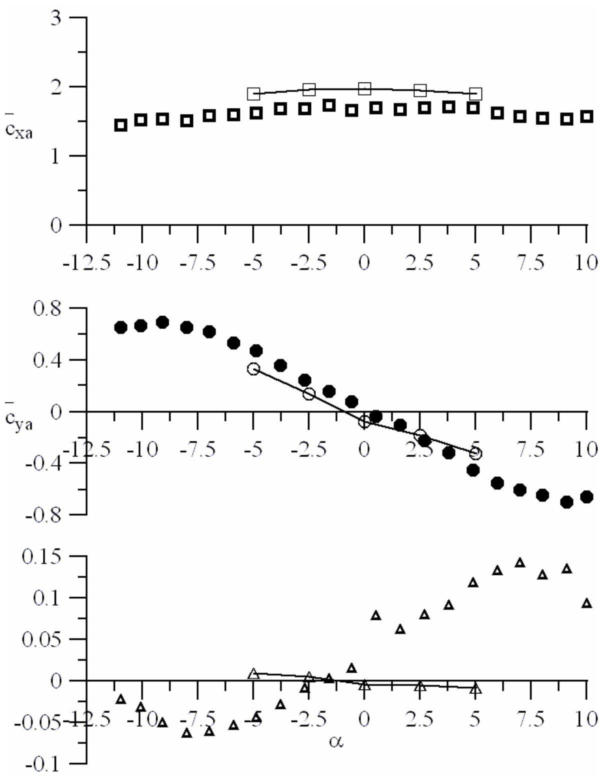


$B/H = 1,24$

а)



б)



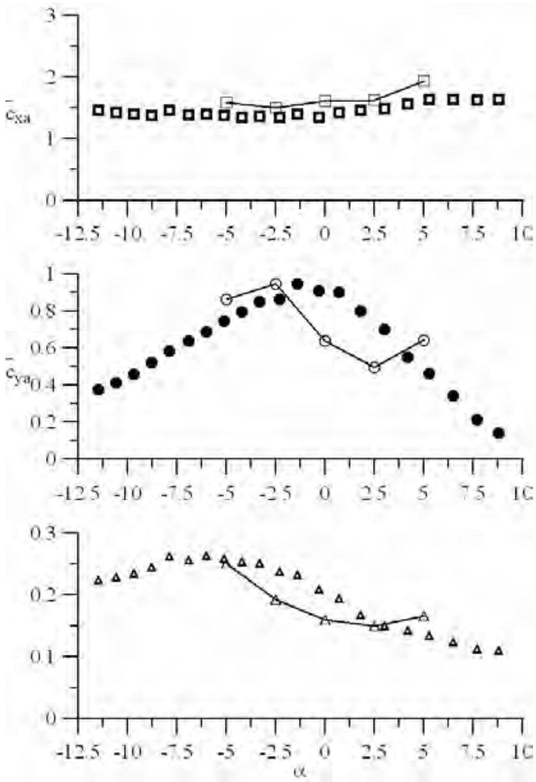
в)

Рис. 5. Узкая одиночная прямоугольная балка (соотношение B/H 1,24):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

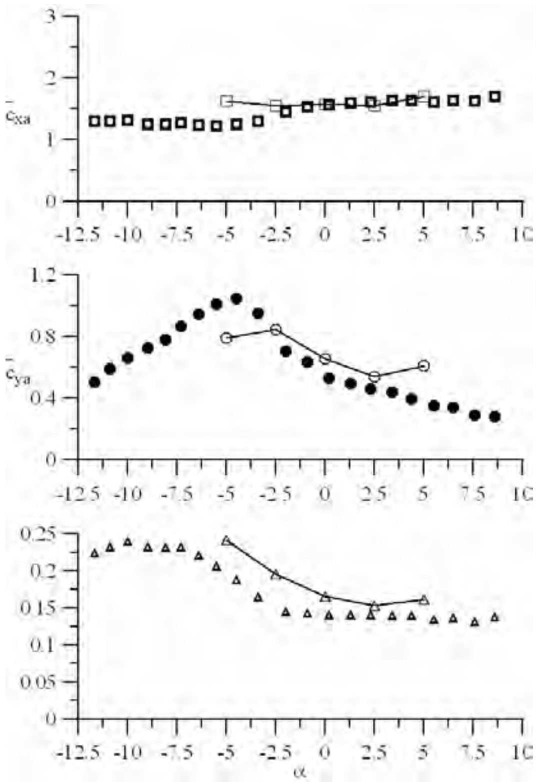


$B/H = 2{,}3$

а)

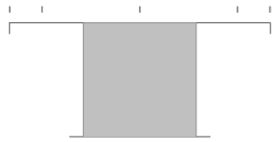


б)



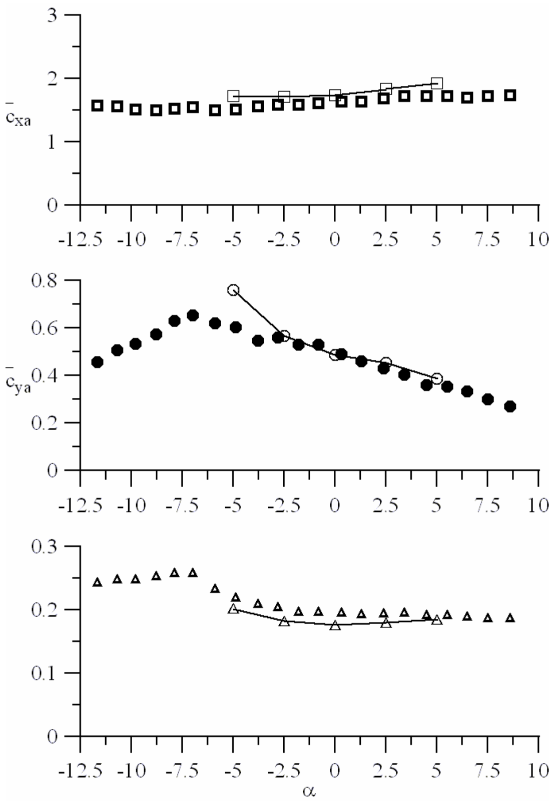
в)

Рис. 6. Узкая одиночная балка с перекрытием (соотношение B/H 2,3):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

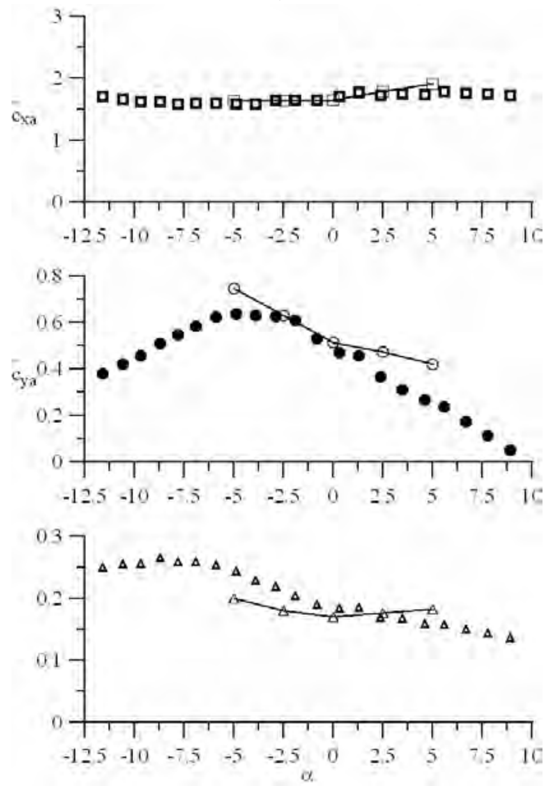


$B/H = 2{,}3$

а)



б)



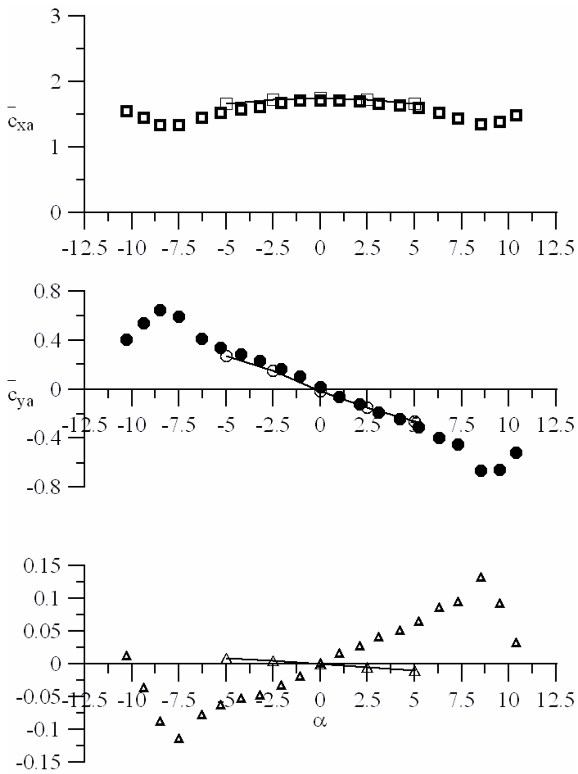
в)

Рис. 7. Узкая одиночная балка с перекрытием и ограждениями (соотношение B/H 2,3): форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

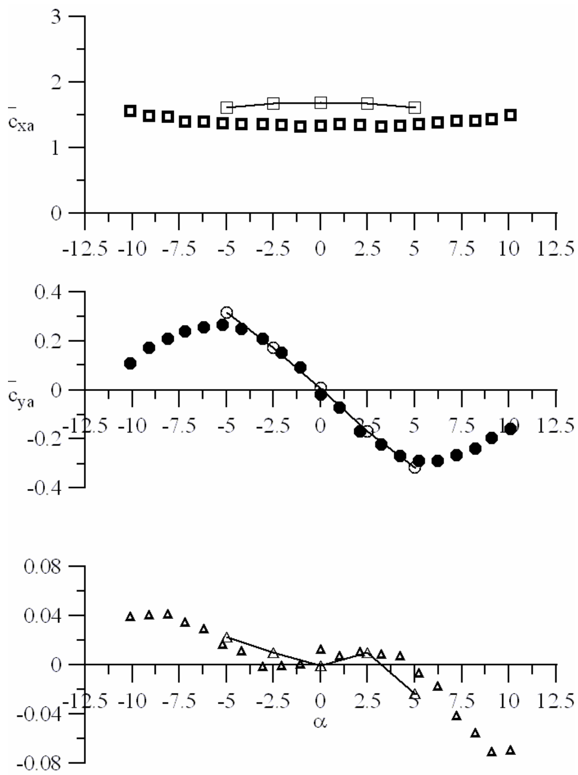


$B/H = 1,85$

а)



б)



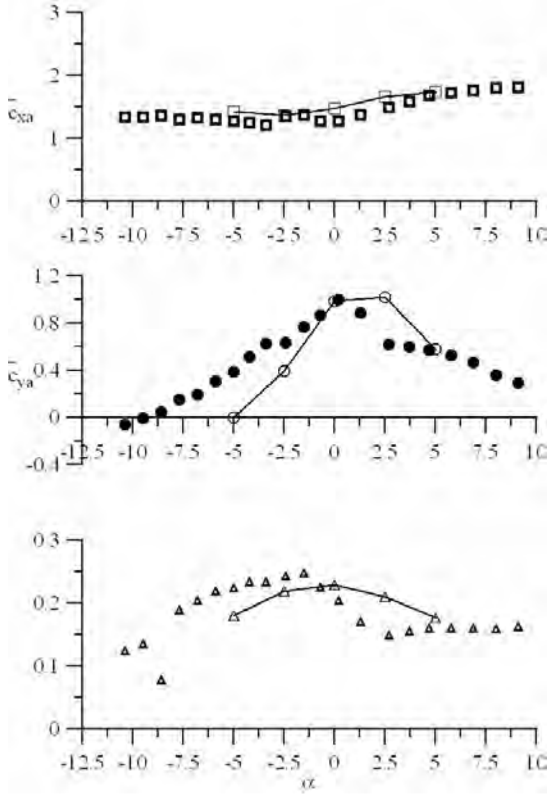
в)

Рис. 8. Широкая одиночная прямоугольная балка (соотношение B/H 1,85): форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

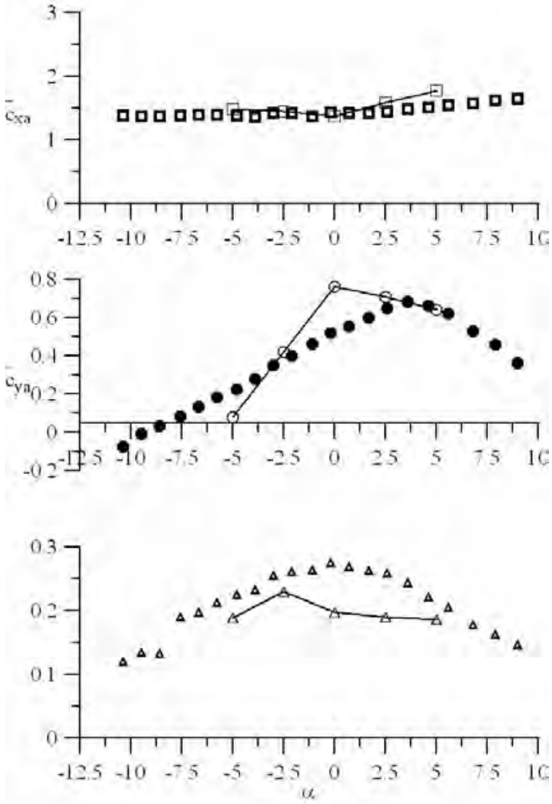


$B/H = 3{,}9$

а)



б)



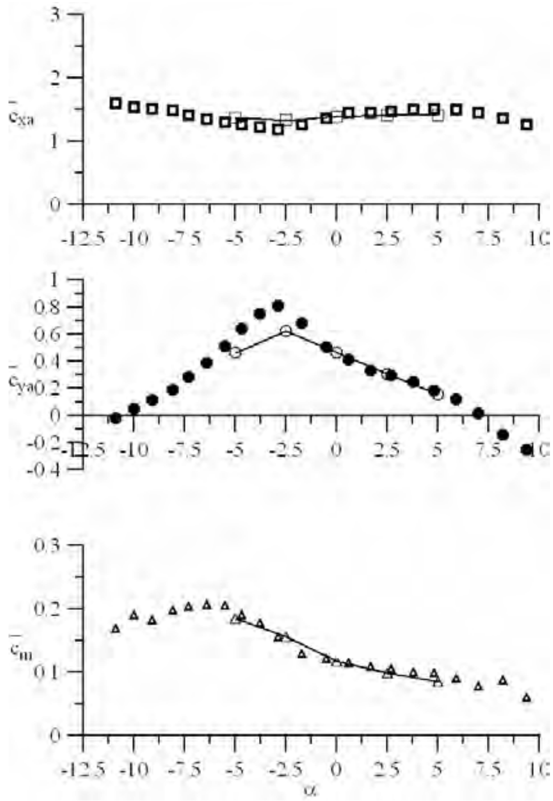
в)

Рис. 9. Широкая одиночная балка с перекрытием (соотношение B/H 3,9):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

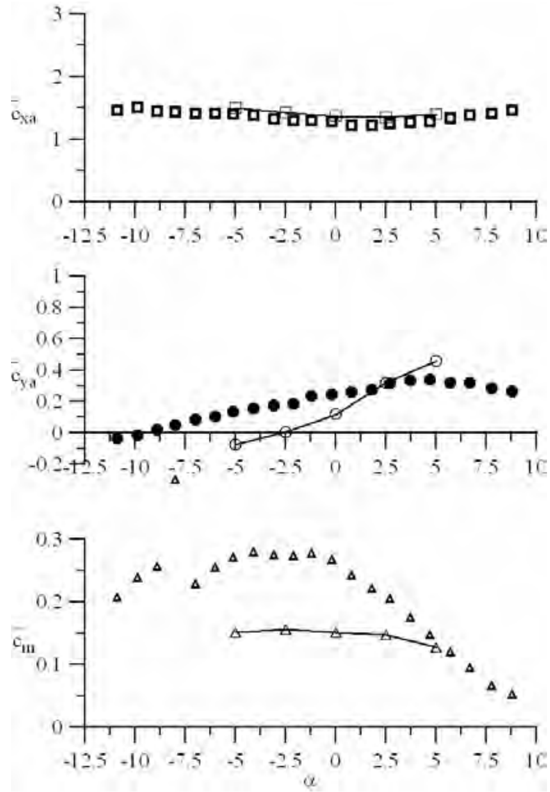


$B/H = 3{,}09$

а)



б)



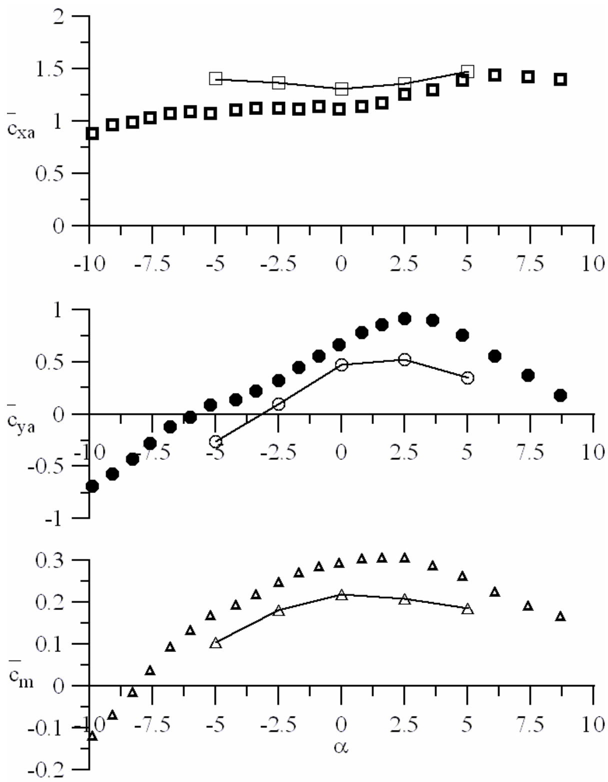
в)

Рис. 10. Трапециевидная балка (соотношение B/H 3,09):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

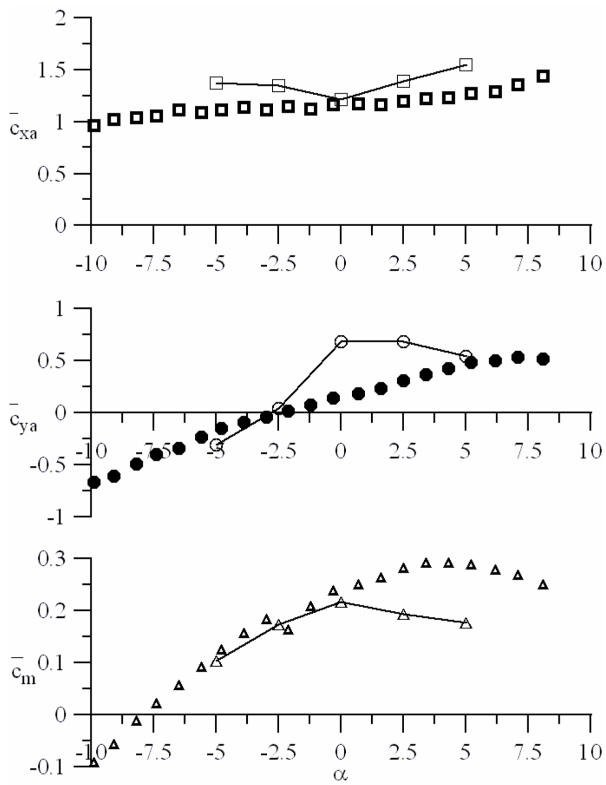


$B/H = 5{,}1$

а)



б)



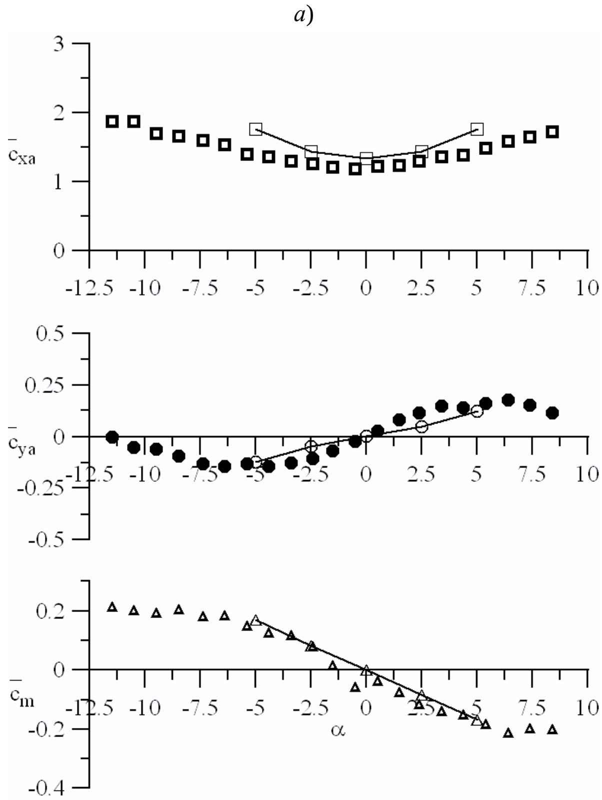
в)

Рис. 11. Трапециевидная балка с перекрытием (соотношение B/H 5,1):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

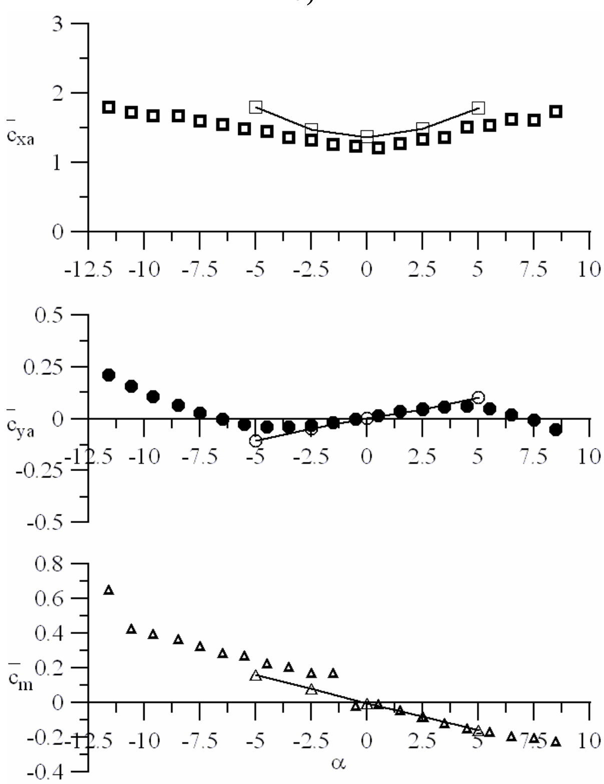


$B/H = 2{,}75$

а)



б)



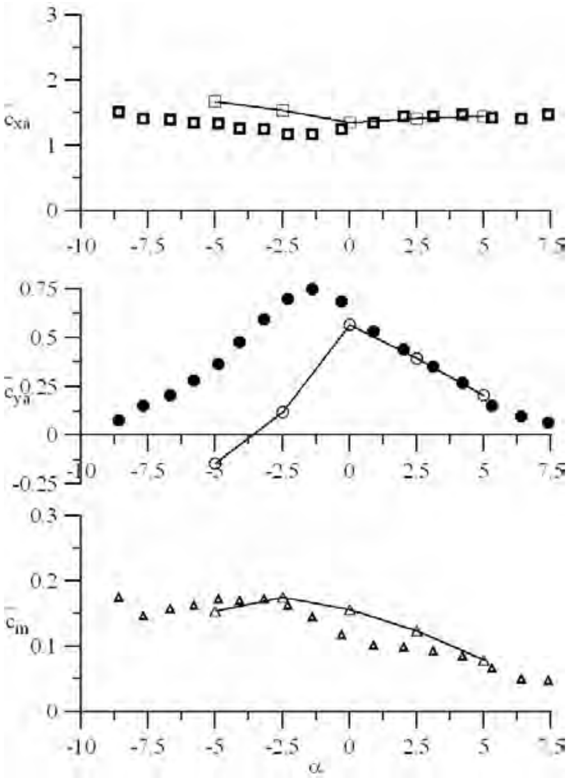
в)

Рис. 12. Двухбалочное строение (соотношение B/H 2,75):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

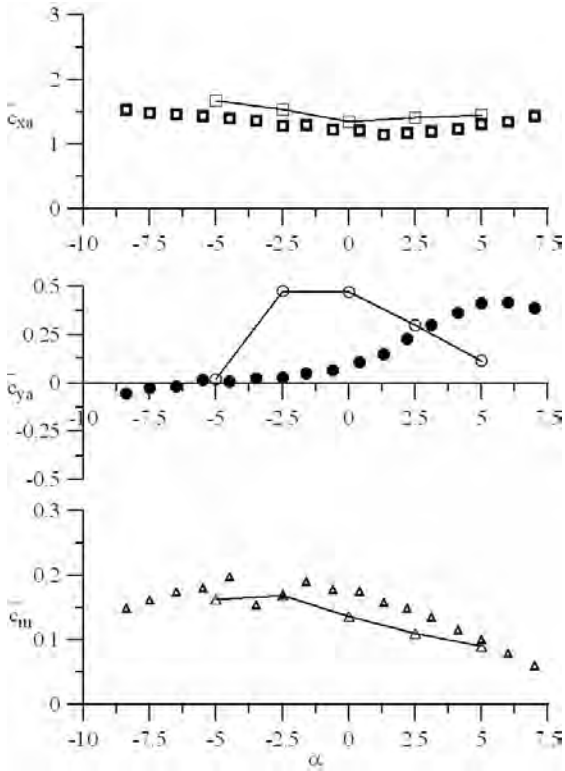


B/H =3,85

а)

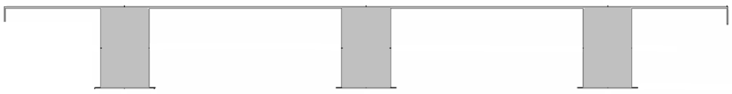


б)



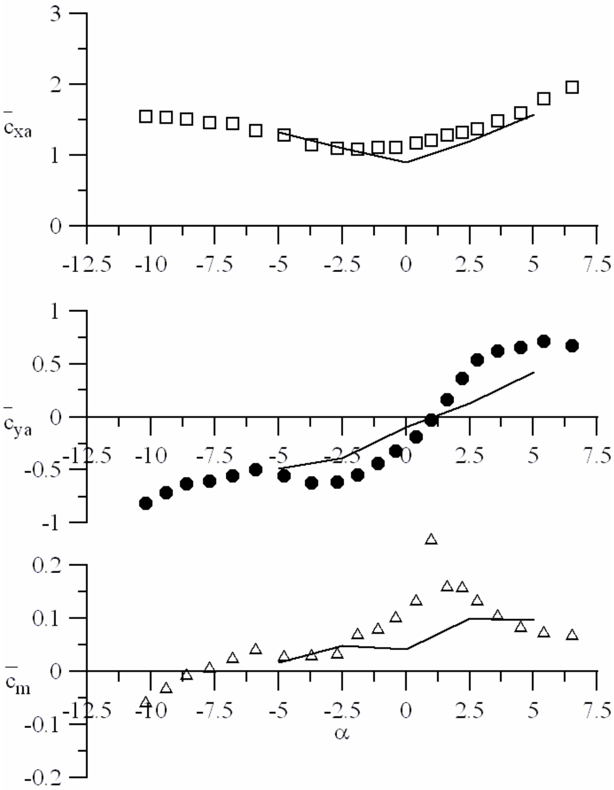
в)

Рис. 13. Двухбалочное строениес перекрытием (соотношение B/H 3,85):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

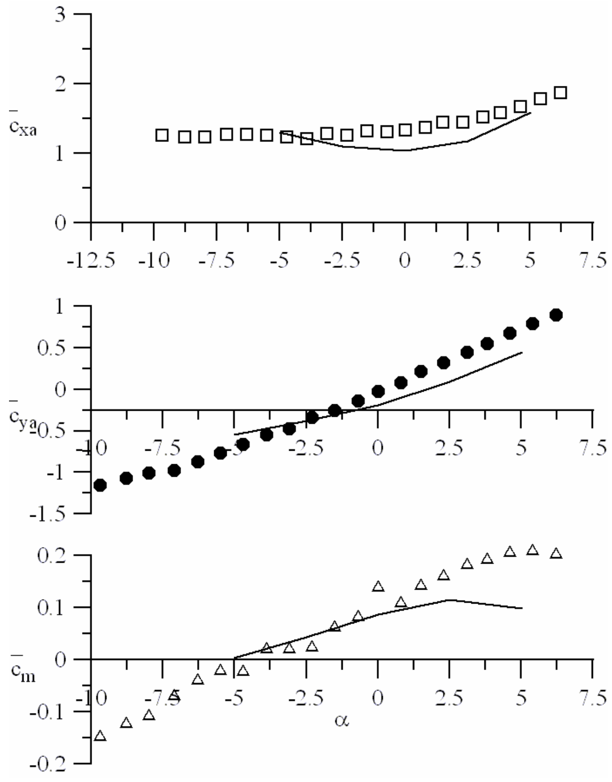


$B/H = 9$

а)



б)



в)

Рис. 14. Многобалочное строение с перекрытием (соотношение B/H 9):
форма поперечного сечения (*а*); гладкий поток (*б*); турбулентный поток (*в*)

Обсуждение и заключения. Анализируя результаты, можно отметить, что за некоторыми исключениями с увеличением относительной ширины B/H сечения однобалочного строения точность расчетного предсказания его АДХ несколько возрастает. Как правило, наилучшее согласование отмечается по лобовому сопротивлению сечения. Для большинства конфигураций расчетные данные несколько выше коэффициента лобового сопротивления, полученного экспериментально. Поясним, что для рассматриваемых плохообтекаемых тел преобладающий вклад в лобовое сопротивление сечения вносит сопротивление формы (давления), в основном определяемое разностью сил давления на наветренной и заветренной сторонах сечения. Принятый расчетный подход огрубляет динамику вихревых структур в области за телом, что приводит к заниженному восстановлению давления в указанной области.

Величина подъемной силы более чувствительна к наличию, протяженности и типу (открыта/замкнутая) отрывных зон. Особенно это касается оснащенного плитой пролетного строения — в этом случае возможно повторное присоединение потока к верхней стороне плиты с образованием замкнутой зоны отрыва (примерно при $B/H \geq 5$). Поэтому по сравнению с лобовым сопротивлением расчетное определение подъемной силы менее точно, особенно для пролетных строений с плитой перекрытия.

Наиболее проблемным для большинства конфигураций является воспроизведение влияния угла атаки на аэродинамический момент сечения.

Если при поперечном обтекании многобалочных пролетных строений между балками возникает аэродинамическая интерференция [12], точность предсказания АДХ падает с увеличением числа балок (относительной габаритной ширины сечения). В этом случае вместо URANS-подхода целесообразно использовать более точные вихреразрешающие методы DES и LES.

Библиографический список

1. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан. — Москва : Стройиздат, 1984. — 360 с.

2. Paidoussis, M.-P. Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities / M.-P. Paèidoussis, S.-J. Price, E. de Langre. — New York : Cambridge University Press, 2011. — 402 p.

3. Kavrakov, I. A synergistic study of a CFD and semi-analytical models for aeroelastic analysis of bridges in turbulent wind conditions / I. Kavrakov, G. Morgenthal // Journal of Fluids and Structures. — 2018. — Vol. 82. — P. 59–85.

4. Spalart, P.-R. Young person's guide to detached-eddy simulation grids [Электронный ресурс] / P.-R. Spalart ; NASA CR-2001-211032 ; Boeing Commercial Airplanes. — Режим доступа: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010080473.pdf (дата обращения: 05.09.18).

5. Monkewitz, P. A. Absolute instability in the near-wake of two-dimensional bluff bodies / P. A. Monkewitz, L. N. Nguyen // Journal of Fluids and Structures. — 1987. — Vol. 1, iss. 2. — P. 165–184.

6. Bruno, L. Analysis of the separated flow around a 5:1 rectangular cylinder through computational simulation [Электронный ресурс] / L. Bruno, N. Coste, D. Fransos // Fifth European & African Conference on Wind Engineering : proc. — Florence, 2009. — Режим доступа: http://www.iawe.org/Proceedings/5EACWE/115.pdf (дата обращения: 05.09.18).

7. On the evaluation of bridge deck flutter derivatives using RANS turbulence models / F. Brusiani [et al.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2013. — Vol. 119. — P. 39–47.

8. Recommendations on the use of CFD in wind engineering [Электронный ресурс] / J. Franke [et al.] // ResearchGate. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/257762096_Recommendations_on_the_use_of_CFD_in_predicting_pedestrian_wind_environment (дата обращения: 05.09.18).

9. Белостоцкий, А. М. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик и исследования реальных объектов / А. М. Белостоцкий, С. И. Дубинский, И. Н. Афанасьева // International Journal of Computational Civil and Structural Engineering. — 2010. — Т. 6, № 1/2. — С. 67–69.

10. Вычислительная аэродинамика строительных сооружений. Задачи и методы / С. В. Гувернюк [и др.] // Вестник МГСУ. — 2011. — Т. 2, № 2. — С. 113–119.

11. ОДМ 218.2.040—2014. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных строений мостов / Новосибир. гос. техн. ун-т ; Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). — Москва : Изд-во ФГУП «Информавтодор», 2014. — 87 с.

12. Саленко, С. Д. Аэродинамические исследования типовых многобалочных конструкций / С. Д. Саленко, Ю. А. Гостеев, А. Д. Обуховский // Теплофизика и аэромеханика. — 2013. — Т. 20, № 4. — С. 451–460.

Поступила в редакцию 30.08.2018
Сдана в редакцию 03.09.2018
Запланирована в номер 01.10.2018

Received 30.08 .2018
Submitted 03.09.2018
Scheduled in the issue 01.10.2018

Об авторах:

Гостеев Юрий Анатольевич,
доцент кафедры «Аэрогидродинамика» Новосибирского государственного технического университета (РФ, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20),
кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4979-3174
gosteev@corp.nstu.ru

Обуховский Александр Дмитриевич,
доцент кафедры «Аэрогидродинамика» Новосибирского государственного технического университета (РФ, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20),
кандидат технических наук, доцент,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-8842-0178,
obuxovskij@corp.nstu.ru

Саленко Сергей Дмитриевич,
заведующий кафедрой «Аэрогидродинамика» Новосибирского государственного технического университета (РФ, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20),
доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-8885-1885
salenkosd@yandex.ru

Authors:

Gosteev, Yury A.,
associate professor of the Aerohydrodynamics Department, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Pr., Novosibirsk, 630073, RF), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4979-3174;
gosteev@corp.nstu.ru

Obukhovskiy, Alexander D.,
associate professor of the Aerohydrodynamics Department, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Pr., Novosibirsk, 630073, RF), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8842-0178
obuxovskij@corp.nstu.ru

Salenko, Sergey D.,
head of the Aerohydrodynamics Department, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Pr., Novosibirsk, 630073, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID :http://orcid.org/0000-0003-8885-1885
salenkosd@yandex.ru